

控制与决策

Control and Decision

考虑生产任务的制造设备关键部件的机会维修优化

何曙光, 石枚弘

引用本文:

何曙光, 石枚弘. 考虑生产任务的制造设备关键部件的机会维修优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 715–720.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1254>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[全寿命周期下退化的大规模系统预防性维修策略优化](#)

Preventive maintenance optimization for deteriorating large-scale systems in life-cycle perspective

控制与决策. 2022, 37(9): 2360–2368 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1813>

[加速冲击损伤退化系统剩余寿命预测及预测维修决策](#)

Remaining useful life prediction and predictive maintenance decision of accelerated shock damage deteriorating system

控制与决策. 2022, 37(10): 2647–2656 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0272>

[两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型](#)

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

[基于马尔可夫过程的多部件系统劣化状态空间划分模型](#)

Multi-component system state space partition model based on Markov process

控制与决策. 2021, 36(2): 418–428 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0480>

[基于随机系数回归模型的退化过程及维修策略](#)

Degradation process and maintenance planning based on random coefficient regression model

控制与决策. 2021, 36(3): 754–760 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1087>

考虑生产任务的制造设备关键部件的机会维修优化

何曙光[†], 石枚弘

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300000)

摘要: 为解决制造设备关键部件的维修决策问题, 将生产任务信息、视情维修以及机会维修相结合, 考虑设备关键部件的剩余价值以及可靠性风险建立维修决策优化模型. 在已有关于视情维修和机会维修成果的基础上, 考虑关键部件的剩余寿命与下一阶段生产任务时长间的关系, 以总成本最小化为目标确定是否在相邻生产任务间利用维修机会, 使得在任务顺利进行的条件下降低成本. 基于逆高斯过程进行部件退化建模, 计算不同维修组合对应的失效概率, 进而构建成本最小化目标规划函数并通过仿真算法得到预防性维修的最优值. 最后通过数值实验验证所提出维修策略的有效性.

关键词: 生产任务; 视情维修; 机会维修; 剩余使用寿命; 逆高斯过程; 关键部件

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1254

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 何曙光, 石枚弘. 考虑生产任务的制造设备关键部件的机会维修优化[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 715-720.

Opportunistic maintenance optimization for key components of manufacturing equipment considering production tasks

HE Shu-guang[†], SHI Mei-hong

(Department of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300000, China)

Abstract: In order to solve the maintenance decision-making problem of the key components in a manufacturing equipment, an optimization model for maintenance decision combining the production tasks, condition-based maintenance (CBM) and opportunistic maintenance (OM) is built considering the residual value and the risk of unplanned downtime. Based on the existing works on CBM and OM, a decision on whether taking OM on the component is made for minimizing the total cost by considering the remaining useful life (RUL) and duration of the following task between two adjacent tasks. This is to decrease the maintenance cost by keeping that the task is not interrupted by equipment failures. In this paper, the inverse Gaussian process is used for component degradation modeling and computing the probabilities of different maintenance combinations. Then the objective function is built for minimizing the total cost of maintenance and the model is solved by simulation. Finally the proposed maintenance strategy is validated by numerical experiments.

Keywords: production task; condition-based maintenance; opportunistic maintenance; remaining useful life; inverse Gaussian process; key component

0 引言

装备制造业是为国民经济进行简单再生产和扩大再生产提供生产技术装备的工业的总称, 即“生产机器的机器制造业”, 是机械工业的核心部分, 承担着为国民经济各部门提供工作母机和带动相关产业发展的重任. 装备产品在其生命周期中伴随着大量的预防性维护、修正性维修, 甚至大修等工作, 在生产运作过程中, 装备维修的频次、维修时间、非计划停机

等都会给用户带来高额损失, 且对于用户生产过程的稳定性、产品质量、成本及其产品交付期等都会产生较大影响.

装备制造机器设备是生产机器的设备, 是以生产任务为导向的任务生产型设备, 在使用期内完成不定时长的生产任务. 在使用过程中, 设备的可靠性和剩余寿命决定着生产产品的合格率, 进而影响产品的销售和顾客满意度. 因此, 对于装备制造设备面向生产

收稿日期: 2021-07-18; 录用日期: 2021-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72032005).

责任编委: 刘向杰.

[†]通讯作者. E-mail: shuguanghe@tju.edu.cn.

任务的维修优化是十分重要的。

视情维修通过传感器传输设备的实时数据,根据数据显示的设备状态进行维修决策.视情维修与机会维修相结合,可以达到更好的成本节约.近年来,视情维修与机会维修相结合的维修方式成为一个新的研究方向.文献[1-2]均考虑到了多部件系统中部件之间的经济依赖型,利用依赖关系之间的维修机会达到维修过程中的成本优化.文献[3]结合部分机会和视情维修策略,将维修优化问题描述为一个有限马尔可夫决策过程,以求得最优的PM、OM阈值.文献[4]考虑了维修系统中的经济和结构依赖,得出系统的最优成组维修结构,形成动态的维修决策.文献[5]提出了一种新的动态维护策略,若维修部件之外的部件超过维修的OM阈值,则采取机会维修达到成本节约.文献[6]提出了一种基于时间阈值的机会主义维护模型,考虑部件之间的结构依赖,研究最优的拆卸顺序以减小维修成本.文献[7]考虑机会维修,将问题描述为半马尔可夫决策过程,以得到最优的维修控制线.文献[8]分析了由非监控和监控两部分组成的复杂系统的维护策略,当监控部件退化到阈值时加以维护,故障维修时对受监控部件进行机会维修.文献[9]与文献[8]相似,考虑部件间的维修机会,文献[9]同时考虑到不完美维修和天气效应,提出了海上风电场的机会性维修政策.文献[10]比较全面地考虑4种不同的维修机会(maintenance opportunity, MO),首次提出了一种广义MO模型,用于现有MOs和新MOs的建模和制定.文献[11]从时间相关性、故障相关性、结构相关性和功能相关性4个方面描述多部件系统,分析了各类相关性对机会成组维修的影响.文献[12]构建了双层目标的机会主义维修策略,从整体上对维修计划进行把握和修正.文献[13]提出了一种基于可靠性的列车关键部件机会预防性维修优化模型.文献[14]研究了可修多部件系统视情机会维修决策问题.

视情维修除了与机会维修相结合外,也与实际生产调度相结合,以更贴合生产实际,得出更加优化的维修策略.文献[15]结合任务约束建立了基于维护相关成本的PM策略优化模型.文献[16]将生产计划、维护决策与机器产量相结合,寻找最优的维修决策.文献[17]考虑生产系统,为一组机器开发了最佳的动态机会预防性维修策略.文献[18]提出了用于串行多级生产系统零件质量检验和预防性维修联合管理决策.文献[19]将视情维修(CBM)与批量生产计划集成,开发了一个集成的生产和维护模型,以尽量减少预期总成本.文献[20]结合生产产品的合格率对生产系统评估,制定维修策略.文献[21]针对转子生产车间,通过调度一组作业任务顺序满足机器

可靠性,达到成本的最小化.文献[22]考虑了系统内各组成部件之间的复杂关系,将机会维修引入到建模中,制订了机会维修、预防性维修、故障后更换的视情维修与生产调度相结合的联合策略.

以往的研究的不足:一是机会维修情况的考虑,大多考虑部件之间的依赖关系,一些天气情况、生产淡季和任务间隔这样的维修机会涉及得较少;二是维修策略大多设置固定的OM阈值,在实际的生产实践中缺乏灵活性,在不同的任务环境下,对于维修的决策往往是不一样的;三是对生产实践中设备将要面临的任务情况的评估很少,没有纳入到维修决策考虑的因素之中.本文基于以上不足,在考虑生产任务的同时,结合视情维修和机会维修,在任务间隔利用维修机会进行动态维修决策,以达到降低成本的目的,制定更加有经济效益的维修策略.

1 维修策略

维修策略涉及符号定义如下:

$X(t)$: 设备关键部件的退化量;

$g(x)$: 设备关键部件退化过程中退化量的概率密度函数;

$G(x)$: 设备关键部件退化过程中退化量的累积分布函数;

$f(t)$: 设备关键部件的剩余寿命概率密度函数;

$F(t)$: 设备关键部件的剩余寿命分布函数;

T : 设备关键部件的寿命;

RUL: 设备关键部件的剩余使用寿命;

$E(RUL_n)$: 设备关键部件的在第 n 次任务时的剩余寿命均值;

$R(t)$: 设备关键部件在 t 时刻的部件可靠性;

$F_{RUL_n|X_n}(r_n|X_n)$: 设备关键部件的在第 n 次任务时的剩余寿命分布函数;

τ_i : 生产任务时长序列;

ω_f : 设备关键部件的失效阈值;

ω_p : 设备关键部件的预防性维修阈值;

C_p : 设备关键部件的预防性维修成本;

C_o : 设备关键部件的机会维修成本;

C_d : 设备关键部件的停机成本;

C_r : 设备关键部件的可靠性惩罚成本;

r : 设备关键部件的剩余价值系数;

h : 设备关键部件的可靠性惩罚系数.

本文针对逐渐劣化且状态可监控检测的生产制造设备中的关键部件,根据关键部件的检测到的指标情况和已知生产任务序列时长,通过对剩余寿命的预测,在任务间隔对关键部件安排维修活动,维修示意图如图1所示,具体的维修策略描述如下:

1) 在执行生产任务期间,若部件的退化状态超

过设定的预防性维修阈值,则在将要超过阈值之前,通过剩余寿命的预测发出部件的维修更换预警,从而进行库存和人员调动的准备,在超过阈值时进行部件的预防性维修更换,更换后设备状态恢复如新;

2) 在生产任务间隔时间内,若部件退化状态超过阈值,则进行机会维修更换;

3) 在生产任务间隔时间内,若未超过维修阈值,则在剩余寿命内不能完成下一任务,通过成本权衡决策后进行机会维修更换,更换后设备状态恢复如新.

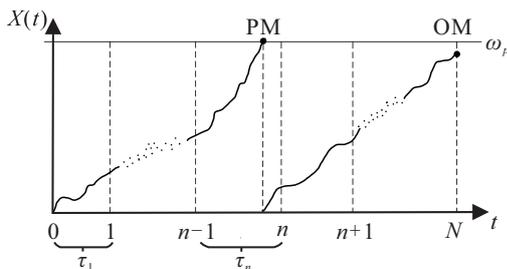


图1 部件两种更换方式的维修示意图

2 模型建立

2.1 模型假设

1) 设备关键部件在任务过程中的系统退化过程被完美监控. 2) 当设备关键部件的状态 $X(t) \geq \omega_p$ 时,进行预防性维修,当设备关键部件的可靠性大于等于0.9时,产生维修费用 C_p 和停机成本 C_d ;当设备关键部件的可靠性大于等于0.9时,产生维修费用 C_o ;当设备关键部件的可靠性小于0.9时,增加风险成本 C_r ,风险成本与关键部件的可靠性有关, $C_r = (0.9 - R(t))h$,其中 h 为风险系数. 3) 若在任务间隔时,关键部件超过预防性维修阈值,则进行维修;若未到达维修阈值,则进行成本估算,通过权衡部件剩余价值以及在任务期间进行维修造成的停工损失,即 $H_g = T \cdot r - C_d$ 与0之间的关系决策是否更换. 当设备关键部件的可靠性大于等于0.9时,产生维修费用 C_o ;

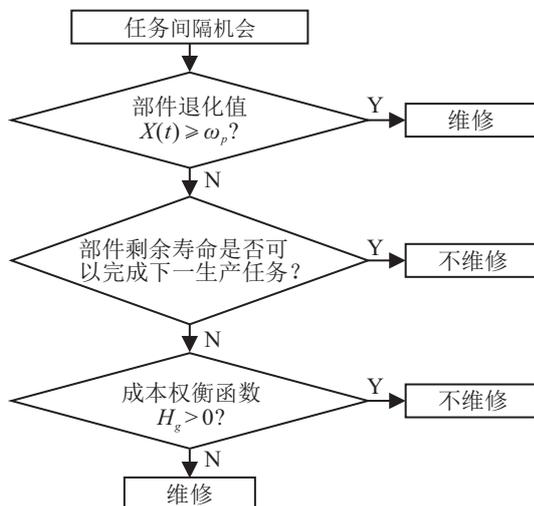


图2 部件机会维修流程

当设备关键部件的可靠性小于0.9时,增加风险成本 C_r . 4) 任务时间为已知的序列 $\tau_i, i = 1, 2, \dots, N$. 5) 维修时间和任务间隔时间相比于任务期较短,本文忽略不计,且假设任务间隔有足够时间进行维修操作. 6) 部件的库存和维修人员充足.

维修策略的部件机会维修流程如图2所示.

2.2 关键部件的退化模型

设备关键部件的退化过程 $X(t)(t > 0)$ 遵循逆高斯过程,根据文献[23]对该随机过程的研究,逆高斯过程具有如下3条性质:1) $X(t)$ 在 $t = 0$ 处连续, $X(0) = 0$ 且以1的概率成立;2) $X(t)$ 有独立的增量,即对于任意 $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq t_4$, $X(t_2) - X(t_1)$ 与 $X(t_4) - X(t_3)$ 相互独立;3) 退化增量 Δx 服从逆高斯分布, $\Delta x \sim IG(\mu\Delta\Lambda(t), \lambda\Delta\Lambda^2(t))$,其中 $\Lambda(t)$ 为时间函数,且 $\Delta\Lambda(t) = \Lambda(t + \Delta t) - \Lambda(t)$, Δt 为时间增量. μ 为均值参数, λ 为尺度参数. 可得 $X(t) \sim IG(\mu\Delta\Lambda(t), \lambda\Delta\Lambda^2(t))$,退化量 $X(t)$ 的概率密度函数为

$$g(x) = \sqrt{\frac{\lambda\Delta\Lambda(t)^2}{2\pi x^3}} \exp\left[-\frac{\lambda}{2x}\left(\frac{x}{\mu} - \Lambda(t)\right)^2\right], \quad (1)$$

其中 $\Lambda(t) = t$.

累积分布函数为

$$G(x) = P(X \leq x) = \Phi\left[\sqrt{\frac{\lambda}{x}}\left(\frac{x}{\mu} - \Lambda(t)\right)\right] + \exp\left(\frac{2\lambda\Lambda(t)}{\mu}\right)\Phi\left[-\sqrt{\frac{\lambda}{x}}\left(\frac{x}{\mu} + \Lambda(t)\right)\right], \quad (2)$$

其中 $\Phi(\cdot)$ 为IG分布函数的正态表示.

设 ω_p 为预防性维修的阈值,则 $X(t)$ 首次到达 ω_p 的时间为 $T = \inf\{t|X(t) \geq \omega_p\}$. 寿命 T 的累积分布函数为

$$F(t) = P(T \leq t) = P(X(t) \leq \omega_t) = \Phi\left[\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\left(\frac{\omega_p}{\mu} - \Lambda(t)\right)\right] - \exp\left(\frac{2\lambda\Lambda(t)}{\mu}\right)\Phi\left[-\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\left(\frac{\omega_p}{\mu} + \Lambda(t)\right)\right]. \quad (3)$$

则 T 的概率密度函数为

$$f(t) = \sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\Phi\left[\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\left(\Lambda(t) - \frac{\omega_p}{\mu}\right)\right] - \frac{2\lambda\Lambda(t)}{\mu}\exp\left(\frac{2\lambda\Lambda(t)}{\mu}\right)\Phi\left[-\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\left(\frac{\omega_p}{\mu} + \Lambda(t)\right)\right] + \sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\exp\left(\frac{2\lambda\Lambda(t)}{\mu}\right)\Phi\left[-\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p}}\left(\frac{\omega_p}{\mu} + \Lambda(t)\right)\right]. \quad (4)$$

根据首达时的概念, t 时刻RUL定义为

$$RUL_n = \inf\{r_n : X(t_n + r_n) \geq \omega_p | X_n\}.$$

则 RUL_n 的累积分布函数为

$$F_{RUL_n | X_n}(r_n | X_n) = \Phi\left[\frac{\lambda}{\omega_p - x_n}\left(r_n - \frac{\omega_p - x_n}{\mu}\right)\right] - \exp\left(\frac{2\lambda r_n}{\mu}\right)\Phi\left[-\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_p - x_n}}\left(r_n + \frac{\omega_p - x_n}{\mu}\right)\right]. \quad (5)$$

剩余寿命的均值为

$$E(RUL_n) = E(E(RUL_n | \mu)) = E\left(\frac{\omega_p - x_n}{\mu}\right) = \frac{\omega_p - x_n}{\mu}, \quad (6)$$

其中 n 为任务间隔点.

由于逆高斯分布具有严格的单调性, 设备的寿命可靠度函数可定义为

$$R(t) = P(T > t) = P(X(t) < \omega_f) = \Phi\left[\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_f}}\left(\frac{\omega_f}{\mu} - t\right)\right] + \exp\left(\frac{2\lambda t}{\mu}\right)\Phi\left[-\sqrt{\frac{\lambda}{\omega_f}}\left(\frac{\omega_f}{\mu} + t\right)\right]. \quad (7)$$

2.3 成本建模

以系统关键部件的整个生命周期为研究时间维度, 以最小化部件生命周期内的长期成本率作为研究目标, 则该部件被更换有以下两种情况:

1) 部件的退化数值大于等于预防性维修阈值而进行预防性维修;

2) 在任务间隔, 经过机会维修决策而被更换.

维修更换的优化模型为

$$\begin{aligned} \min C_{total}; \\ \text{s.t. } 0 < \omega_p < \omega_f. \end{aligned} \quad (8)$$

1) 以预防性维修而被更换.

在任务 τ_n 时, 部件退化阈值超过预防性维修阈值, 对部件进行维修. 如图3所示, 此时需满足两个条件: ① 在 $n - 1$ 时刻退化值小于维修阈值且在 n 时刻退化值大于维修阈值; ② 在 $n - 1$ 时刻未进行机会维修, 部件的剩余寿命大于等于下一个任务时长或剩余寿命小于下一个任务时长, 且维修权衡函数 $H_g = RUL \cdot r - C_d$, 即概率 $P(RUL > C_d/r)$ 若在决策者的风险承受范围之内则不进行维修. 本文将决策者能承受的概率设置为0.95, 与决策者的风险偏好有关, 可根据实际情况进行更改. 因此有

$$P_p(\omega_p) = p\left[X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) < \omega_p \cap X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right) > \omega_p\right] \cdot p(RUL \geq \tau_n) + p\left[X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) < \omega_p \cap X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right) > \omega_p\right] p(RUL < \tau_n) p\left(RUL > \frac{C_d}{r}\right). \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} & \left[X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) < \omega_p \cap X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right) > \omega_p\right] = \\ & \left[X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) < \omega_p \cap X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right) - X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) > \omega_p - X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) > \omega_p\right] = \\ & p\left[X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) < \omega_p \cap X(\tau_n) > \omega_p - X\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) > \omega_p\right] = \\ & \left[1 - F\left(\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right)\right] \int_0^{\omega_p} [F_{R_n | X_n}(\tau_i; x)] f\left(x, \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i\right) dx, \\ & p(RUL < \tau_n) = F_{RUL_n | X_n}(\tau_n | X_n), \\ & p\left(RUL < \frac{C_d}{r}\right) = F_{RUL_n | X_n}\left(\frac{C_d}{r} | X_n\right). \end{aligned} \quad (10)$$

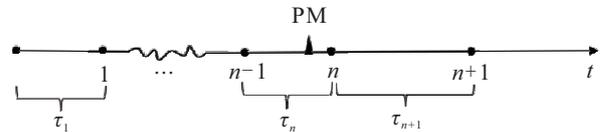


图3 部件预防性维修

2) 以机会维修而被更换.

本文考虑部件剩余寿命产生的剩余价值, 建立在任务间隔时间的机会维修成本权衡函数, 决策该部件在此维修机会是否进行维修. 当进行机会维修时, 如图4所示, 需满足以下两个条件: ① 在 n 时刻退化值大于等于维修阈值; ② 在 n 时刻退化值小于维修阈值, 剩余寿命小于下一任务时长且维修权衡函数 $H_g = RUL \cdot r - C_d \leq 0$. 因此有

$$P_o(\omega_p) = p\left[X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right) \geq \omega_p\right] + p\left[X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right) < \omega_p\right] \cdot p(RUL < \tau_n) p\left(RUL \leq \frac{C_d}{r}\right) = \left[1 - F\left(X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right)\right)\right] + F\left[X\left(\sum_{i=1}^n \tau_i\right)\right] \cdot F_{RUL_n | X_n}(\tau_n | X_n) F_{RUL_n | X_n}\left(\frac{C_d}{r} | X_n\right). \quad (11)$$

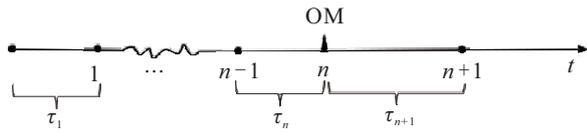


图4 部件机会维修

根据上述维修概率的计算,可得出维修总成本为

$$C_{total} = \frac{EU}{EV} = \frac{\text{totalcost}}{\text{runtime}} = \frac{F(T_{0.9}) \times C_p + (1 - F(T_{0.9})) \times (C_r + C_p)P_p(\omega_p) + F(T_{0.9}) \times C_o + (1 - F(T_{0.9})) \times (C_r + C_o)P_o(\omega_0)}{EV} \quad (12)$$

其中 $F(T_{0.9})$ 表示部件可靠度为0.9时寿命时长的累积分布率。

该部件的生命周期时长期望值为

$$EV = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \tau_i + E(RUL_{n-1}) \right] P_p(\omega_p) + \sum_{i=1}^n \tau_i P_o(\omega_p) \quad (13)$$

将式(9)、(11)、(13)代入(12),可得出总成本的期望函数。将式(12)和(13)代入优化模型(8),可计算求解得出维修策略的预防性维修阈值 ω_p 。

3 数值分析

本节对考虑生产任务关键部件的机会维修优化模型给出数值分析,通过仿真实验求解出最优的预防性维修阈值 ω_p ,并与未进行成本权衡的维修策略进行对比,以验证维修策略的有效性和优越性。

3.1 模型求解

参考文献[24]的相关参数设置,部件的逆高斯退化过程参数 λ 和 μ 分别设为0.25和0.019,部件失效阈值 ω_f 为92,设置任务序列为[60, 70, 40, 80, 70, 80, 50, 60, 70],部件的剩余价值系数 r 为20,部件的可靠性风险系数 h 为10000。为得到部件生命周期内的维护费用率,相关成本参数设置如表1所示。

表1 维修成本参数

参数	C_p	C_o	C_d
维修费用	4000	2500	1500

仿真实验优化算法如下。

step 1: 在 $(0, \omega_f)$ 区间内设置一个较小的 ω_p 值。

step 2: 初始化参数,设置 Runtime = 0, Cost = 0, 计算 C_{total} 数值。

step 3: 逐步增加 ω_p 数值,返回 step 2,直到 $\omega_p \geq \omega_f$ 。

step 4: 在所有计算结果中得到最优的 ω_p 值。经计算,优化算法结果如下:最优阈值为89,维修成本

率为15.837。由图5成本率阈值图可以看出,所提出的维修策略存在使得维修成本率最小的维修阈值。

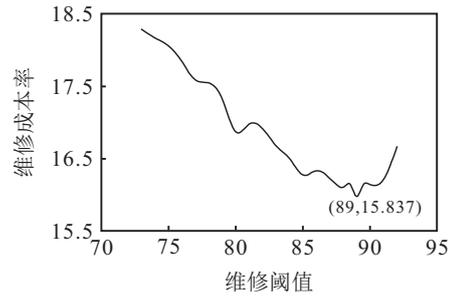


图5 维修成本率-阈值变化

3.2 维修策略比较

将所提出维修策略标记为维修策略A,将以下维修策略标记为维修策略B,有:

- 1) 若设备关键部件在任务期间超过预防性维修阈值,则对其进行维修替换,产生维修成本 C_p ;
- 2) 若设备关键部件在任务间隔超过预防性维修阈值,则产生维修成本 C_o 。

将维修策略B进行优化算法求解,得到预防性维修阈值和成本率的数据。两种维修策略的成本率对比如图6所示。

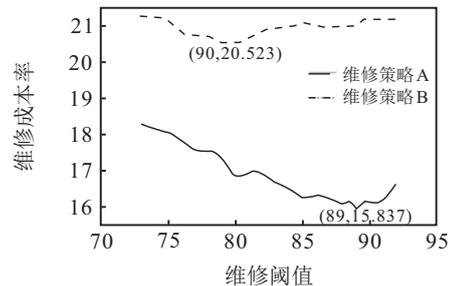


图6 维修策略成本率对比

由图6可见,在任务间隔进行成本权衡,从而对部件进行维修决策,得出成本率小于视情维修策略B的成本率,表明了所提出维修策略的成本优越性。

4 结论

本文针对考虑生产任务的制造设备中的关键部件,在保证生产任务顺利进行和设备可靠性的前提下,在任务间隔机会维修窗口通过考虑关键部件的剩余寿命价值和部件可靠性风险,建立维修决策模型。通过概率计算得出视情维修和机会维修的维修概率,以维修成本最小化为目标,建立维修决策模型,并采用仿真算法进行求解。通过算例分析得出最优的PM维修阈值,并通过不同维修策略的维修成本率对比验证了所提出维修策略的优越性。

本文研究主要针对系统关键部件考虑生产任务结合视情维修和机会维修建模优化,可以将研究向多部件维修扩展;其次可考虑维修时长、维修人员调度、

不完美维修以及传感器的精度等方面进一步优化维修模型。

参考文献(References)

- [1] Tian Z G, Jin T D, Wu B R, et al. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(5): 1502-1509.
- [2] Zhang X H, Zeng J C. Deterioration state space partitioning method for opportunistic maintenance modelling of identical multi-unit systems[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(7): 2100-2118.
- [3] Iung B, Do P, Levrat E, et al. Opportunistic maintenance based on multi-dependent components of manufacturing system[J]. *CIRP Annals*, 2016, 65(1): 401-404.
- [4] Zhao H S, Xu F H, Liang B T, et al. A condition-based opportunistic maintenance strategy for multi-component system[J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(1): 270-283.
- [5] Yuan Q H, Jin Z Z, Jia S, et al. An improved opportunity maintenance model of complex system[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(4): 168781401984151.
- [6] Drent C, Kapodistria S, Resing J A C. Condition-based maintenance policies under imperfect maintenance at scheduled and unscheduled opportunities[J]. *Queueing Systems*, 2019, 93(3/4): 269-308.
- [7] Truong-Ba H, Borghesani P, Cholette M E, et al. Optimization of condition-based maintenance considering partial opportunities[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2020, 36(2): 529-546.
- [8] Vu H C, Do P, Fouladirad M, et al. Dynamic opportunistic maintenance planning for multi-component redundant systems with various types of opportunities[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 198: 106854.
- [9] Kang J C, Soares C G. An opportunistic maintenance policy for offshore wind farms[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 108075.
- [10] Castro I T, Basten R J I, van Houtum G J. Maintenance cost evaluation for heterogeneous complex systems under continuous monitoring[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 200: 106745.
- [11] Yang Y, Li F, Hou C Y, et al. Opportunistic group maintenance optimization of multi-unit system under dependence[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(4): 827-832.
- [12] Fu Y, Yang F, Liu L J, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbines considering component correlation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4057-4063.
- [13] Shi G N, Zhang X H, Zeng J C, et al. Optimal condition-based maintenance decision for repairable systems based on space partition method[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2020, 40(5): 1350-1360.
- [14] He D Q, Luo A, Xiao H S, et al. Research on optimization model of opportunistic preventive maintenance of train key components based on reliability[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(5): 37-43.
- [15] Guo C M, Wang W B, Guo B, et al. A maintenance optimization model for mission-oriented systems based on Wiener degradation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 111: 183-194.
- [16] Ekin T. Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 179: 52-61.
- [17] Hu J W, Jiang Z H, Liao H T. Preventive maintenance of a batch production system under time-varying operational condition[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(19): 5681-5705.
- [18] Rezaei-Malek M, Siadat A, Dantan J Y, et al. A trade-off between productivity and cost for the integrated part quality inspection and preventive maintenance planning under uncertainty[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(19): 5951-5973.
- [19] Wang L, Lu Z Q, Han X L. Joint optimal production planning and proactive maintenance policy for a system subject to degradation[J]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2019, 25(2): 236-252.
- [20] Wang L, Lu Z Q, Han X L. Joint optimisation of production, maintenance and quality for batch production system subject to varying operational conditions[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(24): 7552-7566.
- [21] Ángel-Bello F, Álvarez A, Pacheco J, et al. A single machine scheduling problem with availability constraints and sequence-dependent setup costs[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(4): 2041-2050.
- [22] Gan J, Zhang W Y, Wang L, et al. Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1377-1386.
- [23] Wang H. Analysis and experimental design of degradation data based on the inverse Gaussian process[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [24] Kou H X, An Z W, Ma Q. Fatigue reliability assessment of wind turbine blades based on the performance degradation data[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2017, 38(11): 3174-3179.

作者简介

何曙光(1975—),男,教授,博士生导师,从事质量管理与质量工程、质保管理、运营管理、信息系统等研究,E-mail: shuguanghe@tju.edu.cn;

石枚弘(1995—),女,硕士生,从事质量管理与质量工程、维修运营的研究,E-mail: 2019209102@tju.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)